

# Éclairage de vélo : de l'aide pour les LED

ARNAUD SIVERT, FRANCK BETIN, BRUNO VACOSSIN, SÉBASTIEN CARRIÈRE \*

**Comment fonctionne un éclairage LED pour vélo ? Quels sont les composants qui entrent en ligne de compte ? Comment les évaluer ou les choisir ? Il existe peu de littérature sur le sujet. Voici donc toute l'aide dont vous avez besoin.**

La signalisation des cycles est une problématique cruciale en termes de sécurité et d'utilisation. Ces dernières années, l'évolution des batteries au lithium et des LED (diodes électroluminescentes) ont permis d'avoir un éclairage avant et arrière puissant qui permet de bien voir la route et non plus seulement d'être vu. Le prix de ces éclairages peut varier de 5 à 200 € pour une masse faible d'environ 200 g et une autonomie de 2 à 6 heures. Sur le marché sont proposés de nombreux éclairages avec des puissances, des intensités lumineuses et des éclairages irréalistes ou fallacieux avec pour seul but de vendre et de mieux se démarquer de la concurrence. De plus, les grands constructeurs et les grands distributeurs d'éclairage de vélo ne donnent pas beaucoup d'informations sur les performances des éclairages proposés.

Pourtant, en prenant en compte quelques ordres de grandeur et quelques connaissances scientifiques, il est possible de mesurer les performances d'un éclairage avec un smartphone. Dans cet article, nous allons montrer comment faire des mesures simples de la luminosité, comment faire le choix d'une LED et de son optique en fonction de l'éclairage désiré, comment vérifier les performances d'une LED, comment faire le choix d'un dissipateur, vérifier comment est gérée la régulation d'une ou de plusieurs LED.

Les réponses à toutes ces questions permettront de proposer une exploitation pédagogique pluridisciplinaire d'un éclairage avant et arrière pour vélo. Le lecteur pourra ainsi se lancer dans la réalisation de son propre éclairage.

La législation sur l'éclairage des vélos est identique à celle des motos [2, 3]. Cette législation oblige les vendeurs à fournir l'équipement d'éclairage avec le vélo. Il est généralement de faible performance, de très bas de gamme et de faible coût, permettant d'être vu, mais rarement de pouvoir éclairer la route (voir encadré « La vision humaine »). En moto, la loi

## MOTS-CLÉS

électronique, énergie, conversion, éclairage

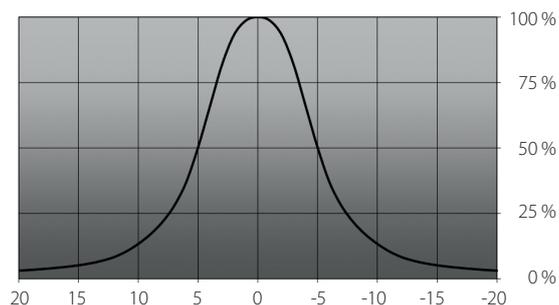
interdit de modifier la puissance des phares halogènes (55 W avec 2 % de déclinaison à 0,8 m de hauteur pour minimiser l'éblouissement), avec 15 W pour l'arrière et 20 W pour le feu stop qui doit être visible le jour. Par contre, en moto, un projecteur additionnel peut être installé. Les LED ayant une consommation 10 fois moindre que les ampoules à filament, pour bien faire il faut une puissance de 10 W à l'avant, 2 W à l'arrière et 3 W au feu stop pour équiper un vélo [6].

## Bref rappel sur l'éclairage

La relation entre le flux lumineux  $\Phi$  (lumen, symbole lm) et l'intensité lumineuse (candela, symbole cd) correspond à l'équation :  $\Phi$  (lumen) = intensité lumineuse (cd)  $\times$  angle solide (stéradian).

Le stéradian est une unité de mesure d'angle en trois dimensions qui correspond à l'équation suivante avec  $\theta$  correspondant à la moitié de l'angle de diffusion total (valable pour les angles inférieurs à 50°) : 1 stéradian =  $2\pi(1 - \cos\theta)$ .

On peut ainsi tracer les courbes de la réflexion relative d'une optique [1].



1 Éclairage relatif d'un réflecteur parabolique symétrique de 10° moyen

L'éclairage (en lux) sur une couronne (entre le rayon extérieur et intérieur) correspond à l'équation suivante :

$$E \text{ (lux)} = \Phi \text{ (lumen)} / (\text{rayon}_{\text{ext}}^2 - \text{rayon}_{\text{int}}^2) \times \pi$$

Par conséquent, il suffit de projeter le flux lumineux sur un mur à une certaine distance pour déterminer l'angle d'une optique parabolique. Puis, en effectuant plusieurs mesures de l'éclairage sur le mur, en déduire le nombre de lumens à partir de la surface éclairée [3].

\* Laboratoire des technologies innovantes, université de Picardie Jules-Verne, institut universitaire de technologie de l'Aisne, Soissons (02).

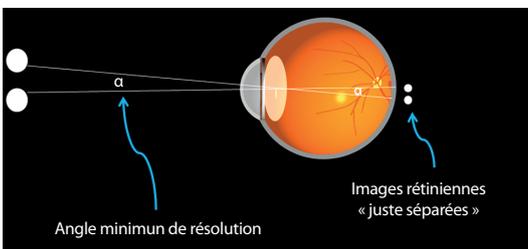
## La vision humaine

L'œil humain peut s'adapter à des niveaux d'éclairément très variables, de 105 lux (une journée ensoleillée d'été) à 2 lux (une nuit de pleine lune). Néanmoins, dans certaines situations, des niveaux minimaux sont requis : par exemple, 5 lux pour se déplacer, 150 lux pour la lecture et l'écriture [1].

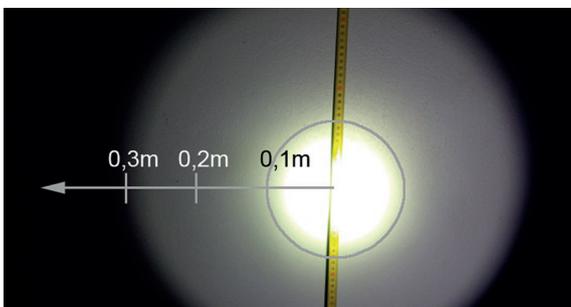
Le pouvoir séparateur de l'œil est donné par l'angle limite de 0,017° sous lequel deux points lumineux proches peuvent être vus distinctement **2**. La législation demande de voir un autre véhicule à 150 m. Par conséquent, la distance séparant deux points lumineux sera perçue à 150 m par l'équation suivante :

$$d = 15000 \times 0,017 \times \pi / 180 = 4,5 \text{ cm}$$

D'ailleurs, les panneaux de signalisation ont généralement des lettres de 20 cm pour être lus intelligiblement à une distance de 100 m.



**2** Pouvoir séparateur de l'œil humain (angle limite de résolution), source : www.gatinel.com



**3** Lampe torche 11 W à 0,5 m du mur, l'angle de l'optique central est de 9° avec un deuxième halo à 38°

L'exemple **3** donne bien la valeur de 1 060 lumens malgré le pas d'échantillonnage utilisé de 5 cm :

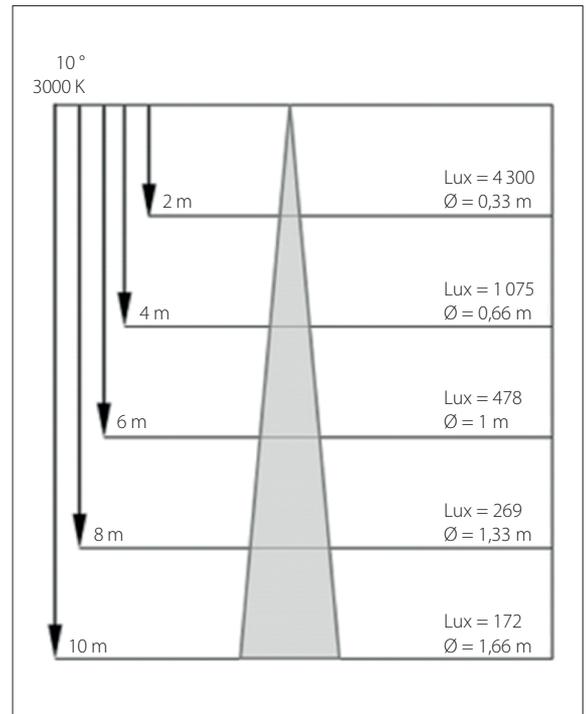
$$\Phi = \pi \cdot \left[ 29k \cdot (0,05^2 - 0) + 17,4k \cdot (0,1^2 - 0,05^2) + 3500 \cdot (0,15^2 - 0,1^2) + 1620 \cdot (0,2^2 - 0,15^2) + 975 \cdot (0,25^2 - 0,2^2) + \dots \right]$$

Théoriquement, l'éclairément pour un angle réduit et rond diminue en fonction du carré de la distance :

$$E_2 \text{ (lux)} = E_1 \text{ (distance}_1) \cdot \frac{(\text{distance}_1)^2}{(\text{distance}_2)^2}$$

Par conséquent, l'éclairément peut aussi s'écrire de la façon suivante :

$$E \text{ (lux)} = \frac{\Phi \text{ (lumen)}}{\text{Surface (m}^2\text{)}} = \frac{\Phi \text{ (lumen)}}{\pi \cdot (\tan \theta \cdot \text{distance})^2}$$



**4** Éclairément pour un réflecteur aluminium de 10° moyen et pour un flux de 991 lm ou 17 200 cd, diamètre 47 mm × 44 L, performance 85 % [11]

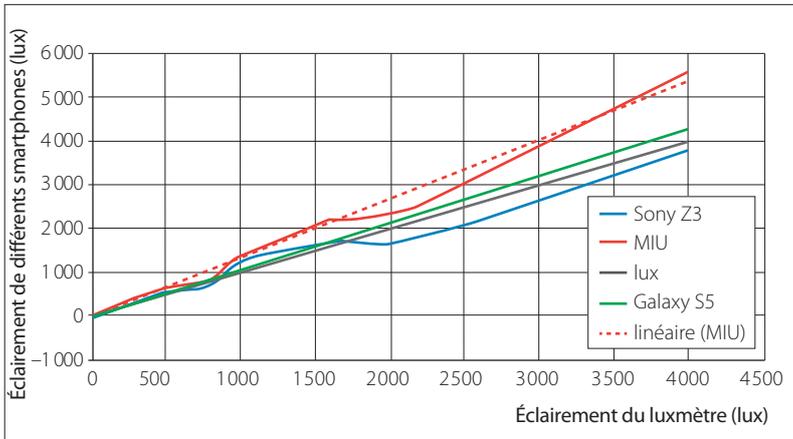
C'est pourquoi la représentation de l'éclairément d'un réflecteur parabolique est représentée par les constructeurs à partir de l'angle moyen **4**. L'éclairément sera divisé par deux en utilisant l'angle moyen par rapport à l'équation précédente.

Évidemment, si le phare ne projette pas le flux lumineux de façon concentrique (par exemple, en ellipse), les trois équations précédentes ne fonctionnent pas pour déterminer le nombre de lumens émis par la LED. Le réflecteur est un élément crucial dans un éclairage [12, 13].

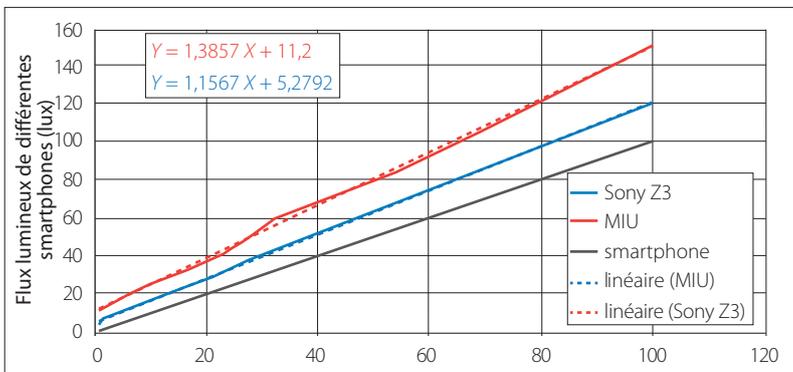
Sur certains phares, on peut aussi déplacer la focale d'une lentille convergente pour choisir l'angle de l'éclairage en fonction d'une certaine distance désirée. Les lentilles convergentes permettent d'avoir un angle plus petit que 5° avec un rendement de 90 % [16].

Pour l'éclairage avant d'un véhicule, il faut faire une cartographie de l'éclairage sur le sol en fonction de l'inclinaison. Le phare avant doit aussi permettre de voir les panneaux de circulation sans éblouir les autres usagers de la route.

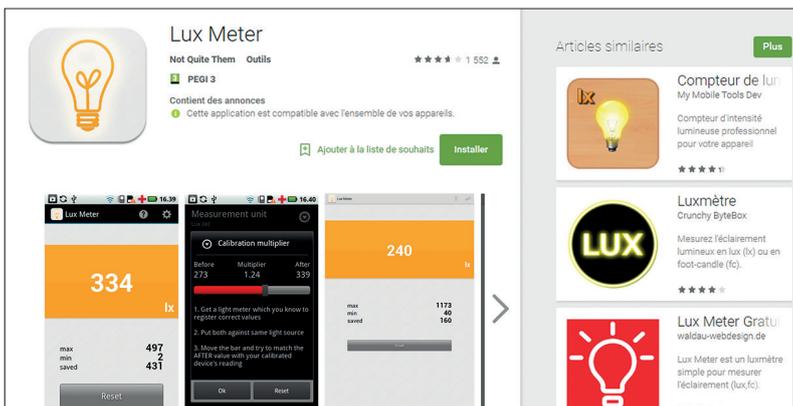
Pour mesurer le flux lumineux, un luxmètre est généralement utilisé. Or, un smartphone peut aussi mesurer cette valeur grâce au capteur de lumière nécessaire à son appareil photo et qui permet aussi de régler la luminosité de l'écran en fonction de la lumière extérieure **7**. Il n'y a pas besoin d'utiliser d'accessoire tel qu'une lentille de Fresnel qui focalise la lumière depuis un angle de 160° vers le



5 Étalonnage et test des performances de l'application Lux Meter de trois smartphones [10]



6 Test des performances des applications « luxmètre » avec deux smartphones sous faible éclairage

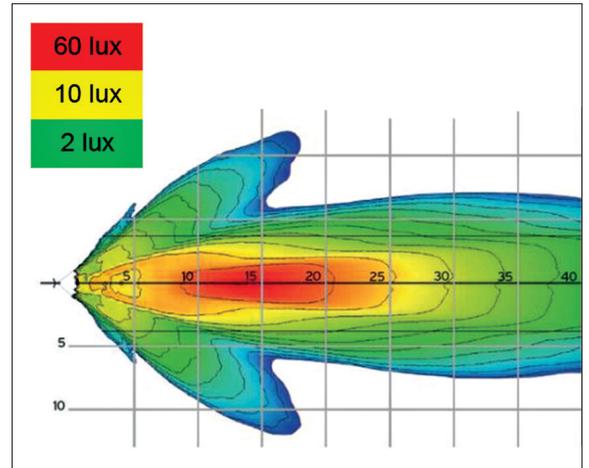


7 Exemple d'applications luxmètre avec étalonnage

capteur. Il faut en revanche bien orienter le capteur du smartphone dans la direction de la source lumineuse.

En fonction du capteur du smartphone, une vérification de l'étalonnage est souhaitable. D'ailleurs, on a pu observer des erreurs de mesure du Sony Z3 et du Xiaomi MIU4 avec l'application Lux Meter 5 6 7.

En se concentrant sur ces écarts dans la partie à faible valeur de l'éclairage, on peut observer qu'il y a un décalage entre les valeurs données par le smartphone et l'application Lux Meter 6.



8 Cartographie (lux) en fonction de la distance sur le sol d'un éclairage vélo d'une lumière 3 W (vue de dessus)

Ainsi, la cartographie d'un éclairage peut être réalisée à la main en prenant de nombreux points et à l'aide d'un goniomètre, appareil servant à mesurer les angles 8 [4].

En photométrie, on s'intéresse à l'énergie des rayonnements lumineux en tenant compte de la sensibilité de l'œil, nommée « efficacité lumineuse spectrale ». L'œil est sensible aux rayonnements de longueurs d'onde comprises entre 400 nm (bleu) et 700 nm (rouge). Par exemple, le flux énergétique de 1 W à la longueur d'onde de 555 nm (vert jaune) est de 673 lm/W ; en revanche, à la longueur d'onde de 600 nm (orange), le flux perçu par l'œil sera de 430 lm/W.

Dans cet article, le spectre de la LED ne sera pas pris en compte. Il faut cependant savoir que les LED blanches sont de trois types en fonction du spectre : froide (120 lm/W), neutre (110 lm/W), chaude (92 lm/W) correspondant à différentes températures de couleur mesurée en kelvins.

### Choix de la source d'alimentation

Ce choix a des conséquences importantes sur la puissance de l'éclairage.

Depuis 2008, les dynamos intégrées dans le moyeu d'un vélo peuvent fournir une puissance de 3 W avec un rendement d'environ 65 % pour des vitesses au-delà de 15 km/h, une masse de 550 g et un coût d'environ 90 €. La puissance générée par la dynamo étant proportionnelle à la vitesse, elle doit être associée à une réserve d'énergie qui est souvent un supercondensateur d'environ 1 farad/5,5 V. Cette réserve d'énergie permet d'alimenter pendant une minute un éclairage demandant une puissance de 0,2 W, lors d'un arrêt à un feu rouge par exemple.

Depuis 2010, les éléments lithium 18650 (60 g, 2,5 Ah, 3,7 V, 9,5 Wh, résistance interne 0,1 Ω) permettant de délivrer 3 A sont souvent utilisés pour l'éclairage des vélos. Ces éléments sont souvent

associés en série pour obtenir davantage de tension ou associés en parallèle pour davantage de courant.

Par exemple, une batterie 3S2P contient trois groupes en série de deux éléments en parallèle, ce qui permet d'obtenir une batterie de 5 Ah dont la tension va varier de 12,3 à 9 V en fonction de la décharge.

Quelques remarques :

- avec des accumulateurs NiMH type AA (3 Wh, 30 g), le courant de décharge ne peut dépasser 0,25 A à cause de la résistance interne de 1,5 Ω. Par conséquent, cet accumulateur ne peut pas fournir de grosses puissances. Les vélos électriques qui ont des batteries importantes (de 36 à 72 V, de 10 à 20 Ah) pour le moteur permettent d'alimenter l'éclairage. Un régulateur est alors nécessaire entre cette batterie et l'éclairage à LED ;

- depuis 2012, pour être vu, il est possible d'utiliser de petits éclairages (0,08 W, 2 €, 0,8 lm, 19 g) d'une seule LED alimentée par deux piles CR 2032 (3 V, 0,40 € × 2, 220 mAh, autonomie 10 heures). Au-delà de 10 heures, si on oublie d'arrêter la décharge, les deux piles seront déchargées et devront être changées. Ces deux piles peuvent aussi être remplacées par des accumulateurs rechargeables pour deux à 4,5 € (LIR 2032 = 3,7 V, 40 mAh, 2 Ω). L'autonomie est alors réduite à 2,5 heures.

À ce stade, comment déterminer l'autonomie de l'éclairage en fonction de la puissance ?

### L'autonomie en fonction de l'alimentation de la batterie

L'autonomie reste le principal inconvénient de l'alimentation par batterie, elle va dépendre de la puissance de la LED et du rendement du régulateur. Ce temps correspond à l'équation suivante :

$$\text{Temps (h)} = \frac{\text{Capacité}_{\text{énergétique}} \text{ (Wh)}}{\sum \text{Puissance}_{\text{absorbée des LED}} + \text{Puissance}_{\text{régulateur}}}$$

L'éclairage arrière peut être clignotant depuis la modification de l'article R. 313-25 en 2015. Cela permet d'augmenter le temps de fonctionnement ou la puissance de l'éclairage pendant le temps d'allumage connaissant le temps de repos. En effet, la puissance moyenne correspondra à l'équation :

$$\text{Puissance}_{\text{moyenne}} = \text{Puissance}_{\text{éclairage}} \times t_{\text{on}} / T$$

avec  $t_{\text{on}}$  correspondant à l'allumage et  $T$  à la période.

### Caractérisation d'une LED

Une LED est caractérisée par sa tension de seuil, son courant maximal, son nombre de diodes en série et en parallèle, sa puissance maximale, son angle d'émission, sa luminosité (en lumens par watt), sa résistance thermique, son spectre, sa CCT (*Correlated*

Type de LED Puissance, angle, prix	Configuration	Dimensions (mm)	RTH <sub>c</sub> (°C/W)	Flux (lm/W)
White 0,12 W, 20°, 0,40 €	1S 0P 3,3 V, 0,04 A	5		60
White 3 W, 120°, 1,50 €	1S 0P 3,3 V, 3 A	∅ 13,9	2,5	80 à 100
White 10 W, 120°, 10 €	3S 3P 11 V, 1 A	∅ 13,9	2,5	90 à 110
Red 3 W, 140°, 10 €	1S 0P 2,5 V, 1,4 A	∅ 13,9	2,5	70
Red 0,07 W, 8°, 0,5 €	1S 0P 1,8 V, 0,04 A	10		10
RVB 0,2 W, 120°	1S 3P SMD5050		5 × 5	13

#### 9 Caractéristiques de différentes LED

*Color Temperature*) ou température de couleur (rouge, blanc froid, blanc neutre, ou blanc chaud).

Le tableau 9 compare différentes LED. Attention, les caractéristiques données sur Internet sont parfois peu fiables ; par conséquent, des essais doivent être effectués pour vérifier leurs performances.

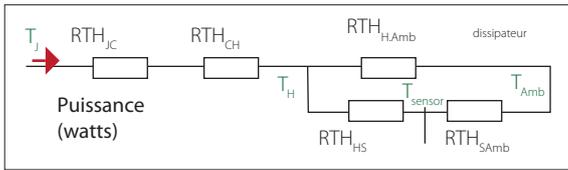
Certaines LED de puissance sont constituées en interne d'une matrice de LED [5]. Ce tableau ne prend pas en compte les LED qui ont plus de trois LED en série pour ne pas avoir de tension de seuil trop importante.

Pour l'éclairage d'un vélo, deux types de LED sont utilisés : les *low power chips* (inférieure à 0,2 W) et les *power chips* (entre 1 et 10 W). Les premières permettent d'être vu (il faut éventuellement multiplier le nombre de LED) et les deuxièmes permettent de voir.

Les LED peuvent être mises soit en série (S), soit en parallèle (P) en fonction de la tension d'alimentation ou du régulateur. Par exemple, une lampe 3S 2P sera composée de deux groupes en parallèle de trois LED en série, donc de six LED.

Les LED ont une durée de vie de l'ordre de 50 000 heures, soit 50 fois plus qu'une lampe à incandescence. Cependant, leur fiabilité est réduite lors d'un montage en série. En effet, dès qu'une LED d'une série ne fonctionne plus, l'ensemble ne fonctionnera plus. En revanche, un montage en parallèle augmente par redondance la fiabilité du système d'éclairage.

Les rubans ou flexibles sécables à LED n'utilisent que trois LED de faible puissance en série sous une tension de 12 V avec une résistance pour limiter le courant. Ces rubans à LED autocollants (66 LED par mètre, 12 V, 0,4 A/m, 12 €/m ; 120°) permettent d'avoir une grande surface d'éclairage, mais pas visible de jour, ce qui est nécessaire pour réaliser un feu stop. On peut observer que les LED trois couleurs (RVB)



10 Modèle thermique d'un phare à LED avec son dissipateur et le capteur de température [5]

qui sont utilisées pour obtenir une lumière blanche n'ont pas une grande performance énergétique.

Pour toutes les LED, il est inutile d'augmenter le courant dans l'idée d'avoir davantage de flux, car en général à partir d'un coefficient 2 le flux est saturé. De plus, la puissance lumineuse est souvent limitée par le dissipateur.

**Le dissipateur**

Le dissipateur doit être dimensionné afin de ne pas dépasser la température limite de la LED.

Le schéma thermique de l'éclairage en régime établi correspond au modèle ci-dessous avec une température de jonction  $T_j$  maximale de 150 °C, RTH la résistance thermique, C le boîtier (*case*), H le dissipateur (*heatsink*), Amb la température ambiante, S le capteur (*sensor*) fixé sur le dissipateur et J la jonction 10.

À partir de ce modèle thermique, les équations de la température de jonction de la LED  $T_j$  et la température du boîtier  $T_{Amb}$  sont les suivantes :

$$T_j - T_{Amb} = (RTH_{JC} + RTH_{CH} + RTH_{H,Amb} \times Puissance$$

La température du dissipateur (H) peut être déterminée par l'équation suivante :

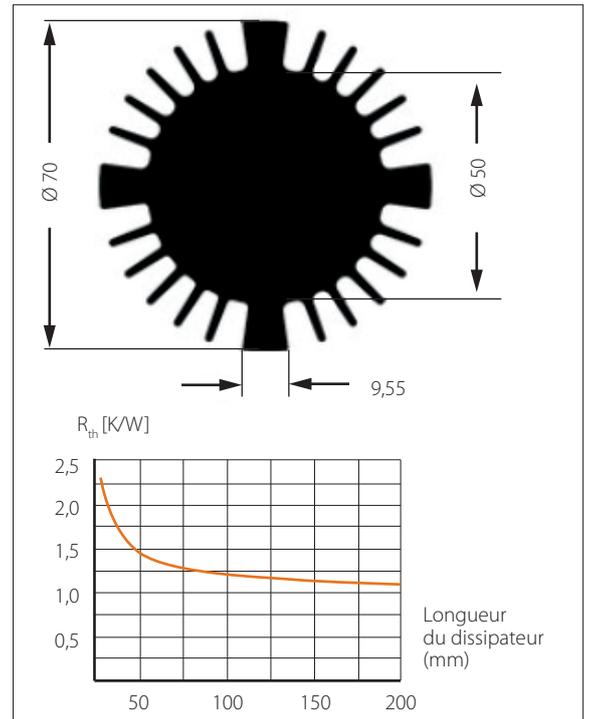
$$T_H - T_{Amb} = RTH_{H,Amb} \times Puissance$$

La résistance thermique du dissipateur peut être déterminée par un logiciel, mais aussi par un calcul en fonction de sa forme et du matériau utilisé. La résistance thermique dépend surtout de la convection qui résulte de nombreux facteurs (forme du dissipateur, surface, type d'écoulement...) : des essais sont donc souvent nécessaires.

Avec une convection naturelle de l'air, la résistance thermique d'une plaque d'aluminium verticale correspond environ à l'équation suivante, avec  $h \approx 10 \text{ W m}^{-2} \text{ °C}^{-1}$ . Avec des ailettes, le coefficient  $h$  passe environ à 80. Ce coefficient dépend aussi de la différence de température entre le dissipateur et l'air ambiant.

$$RTH_{H,Amb} \approx \frac{1}{h \cdot Surface \text{ (m}^2\text{)}}$$

Parfois, on s'aperçoit que ce n'est pas la peine d'avoir de grandes longueurs de dissipateur, car à cause de la conduction thermique il y a peu de différences de température lorsqu'on s'éloigne de la source chaude, et donc peu de convection 11.



11 Exemple de dissipateur (pour LED SK 570)

À partir de la courbe de puissance admissible par le constructeur de la LED en fonction de la température ambiante, les valeurs de la température de jonction maximale et de la résistance thermique jonction-RTH<sub>JA</sub> ambiante peuvent être retrouvées. En effet, en prenant les deux points noirs sur la courbe 12 (10 W = 3 A × 3,3 V,  $T_{Amb\_max}$  35 °C et 3 W = 1 A × 3 V,  $T_{Amb\_max}$  115 °C) avec une température de jonction maximale de 150 °C, la valeur de RTH<sub>JA</sub> de 10 °C/W sera confirmée par l'équation.

À l'inverse, le courant maximal de la LED peut être déterminé à partir de la température ambiante. Le point rouge sur la courbe 12 désigne, à partir de  $V_{seuil}$ , la tension de seuil *forward voltage* d'une LED blanche qui est d'environ 3,25 V.

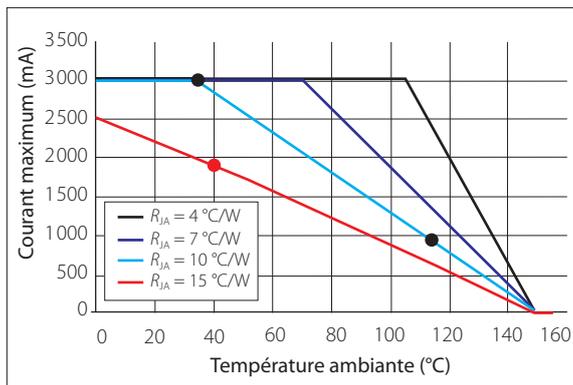
$$I_{forward\ max} = \frac{T_j - T_{Amb}}{R_{TH_{JA}} \cdot V_{seuil}} = \frac{150 - 40}{15 \times 3,25} = 1,35 \text{ A}$$

On remarque que plus RTH<sub>JA</sub> est petit et plus la température ambiante pourra être grande, mais plus le dissipateur devra avoir une surface importante.

À partir de la puissance fournie à la LED et de la mesure de la température du refroidisseur  $T_H$ , la température de jonction  $T_j$  peut être estimée à partir de l'équation suivante :

$$T_j = T_H + RTH_{JC} \times Puissance$$

Pour faire des essais et pour ne pas dépasser la température maximale de la LED, la température peut être mesurée par un capteur linéaire LM × 35 (boîtier To92) qui fournit une tension de 10 mV/°C.



**12** Courant disponible d'une LED blanche 10 W en fonction de la température ambiante et du dissipateur [7]

Il y a un décalage entre la mesure du capteur et la température réelle du boîtier à cause de la résistance thermique du capteur ambiant  $R_{TH_{SAmb}}$  140 °C/W et  $R_{TH_{HS}}$  30 °C/W (voir 10). Le temps de réponse de ce capteur est de 2 minutes, bien inférieur à celui du dissipateur de la LED.

La température réelle du refroidisseur  $T_{heatsink}$  en fonction de la température du boîtier capteur correspond à l'équation suivante :

$$T_H = \left( T_{\text{sensor}} \cdot \left( 1 + \frac{R_{TH_{HS}}}{R_{TH_{SAmb}}} \right) - \frac{R_{TH_{HS}}}{R_{TH_{SAmb}}} \cdot T_{\text{Amb}} \right)$$

Par exemple, si la température mesurée est de 53 °C avec une température ambiante de 20 °C, alors la température du radiateur sera de 60 °C.

Si le boîtier du capteur était un To220, alors  $R_{TH_{SAmb}}$  serait de 90 °C/W avec un temps de réponse de 3 minutes. Ce boîtier permet de minimiser la résistance de contact à 4 °C/W, d'avoir une mesure de température très proche de celle du dissipateur et donc de ne plus utiliser l'équation précédente.

Un thermomètre infrarouge permet de vérifier la différence entre la mesure du capteur et celle du refroidisseur.

Pour l'éclairage d'un vélo, il n'est pas envisageable de prévoir une ventilation forcée lorsque l'on prend en compte les dimensions et la masse du dissipateur. C'est alors le déplacement du vélo qui permet de mieux refroidir son système d'éclairage. Selon la vitesse de déplacement, il est donc possible de faire varier la puissance lumineuse en fonction de la température du dissipateur : par exemple, une régulation de la température du dissipateur à sa valeur critique en modifiant la puissance lumineuse et perdue de la LED. Dans ce cas, lors de l'arrêt du vélo ou lorsque la température ambiante est élevée, la puissance lumineuse sera moins grande et il y aura une protection de la LED.

Beaucoup d'éclairages de vélo sont en polymère thermoplastique léger facile à mouler et donc à

produire. Cependant, le plastique ne permet pas de bien évacuer la chaleur en comparaison d'un boîtier aluminium. Le boîtier aluminium sera certes plus résistant à certains chocs, mais aussi plus cher à usiner.

Il est à remarquer que très peu de fabricants donnent le rendement de leurs LED, alors que cela permettrait de connaître correctement la puissance émise et la puissance perdue. Il faut donc souvent faire des essais pour connaître les limites extrêmes que peut supporter la LED.

### L'éclairage arrière

La signalisation d'un véhicule doit permettre d'être visible à 150 m (législation R. 313). L'optique de l'éclairage arrière a donc aussi son importance. Un angle d'éclairage de 6° permet de garantir une plus grande visibilité de loin. Pour ce qui est de la puissance, 20 LED rouges de 30 mA (1,2 W au total) est un minimum pour la signalisation de nuit 13 ; 30 LED, c'est mieux. Par contre, une puissance de 3 W pour le feu stop est réellement nécessaire, notamment en plein été, pour avertir un autre véhicule. Le feu stop peut être alimenté par un bouton-poussoir intégré aux freins, mais aussi par un accéléromètre, un capteur qui détecterait chaque décélération.

### L'éclairage avant

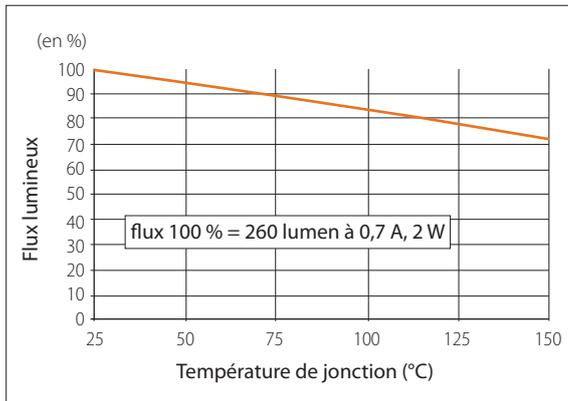
À la vitesse de 54 km/h (15 m/s), un éclairage à 30 m est un minimum pour pouvoir éclairer la chaussée et les accotements. À cette vitesse, le véhicule arrive sur un obstacle en 2 secondes [6].

Une LED de 10 W est prise en exemple ; cette puissance a été justifiée en début d'article. Les LED de puissance ont toutes un demi-angle  $\theta$  de 60°. Pour amplifier l'éclairage de la route, un réflecteur est utilisé afin de réduire ce demi-angle à une valeur inférieure à 10°. Le réflecteur est souvent réalisé en aluminium pour permettre d'évacuer la chaleur vers l'extérieur.



**13** Feu arrière à 20 LED

*Le déplacement  
du vélo  
permet de refroidir  
l'éclairage  
et d'augmenter  
la puissance  
lumineuse*



14 Performance relative du flux en lumens qui diminue en fonction de la température de jonction [7]

Prenons comme exemple un refroidisseur cylindrique de diamètre 4,5 cm, de longueur 5 cm et de masse 170 g. La résistance thermique du dissipateur  $R_{TH_{HAmb}}$  est de  $9,6 \text{ }^\circ\text{C/W}$ . Donc, pour une puissance absorbée  $P_{abs}$  de 10 W, la température du dissipateur sera de  $96 \text{ }^\circ\text{C}$  avec une résistance thermique jonction-dissipateur de  $0,625 \text{ }^\circ\text{C/W}$ ; la température de jonction serait de  $102 \text{ }^\circ\text{C}$ , si l'on ne prenait pas en compte l'énergie nécessaire pour obtenir le flux lumineux.

Pour une température de jonction de sécurité maximale de  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , la température ambiante peut atteindre alors la valeur suivante, où  $P_{lumi}$  est la puissance lumineuse (en watts) :

$$T_{Amb\ max} = T_j - (R_{TH_{jH}} + R_{TH_{HAmb}}) \times (P_{abs} - P_{lumi})$$

Soit  $\eta_{led}$  le rendement de la LED, qui correspond à 30 % environ, la température ambiante maximale est donnée par :

$$T_{Amb\ max} = T_j - (R_{TH_{jH}} + R_{TH_{HAmb}}) \times P_{abs} (1 - \eta_{led})$$

Ce qui donne ici :

$$T_{Amb\ max} = 100 - (0,625 + 9,6) \times (10 \times 70\%) = 28 \text{ }^\circ\text{C}$$

Le flux lumineux diminue légèrement lorsque la température augmente 14. N'oublions pas cependant que le déplacement du vélo permet de mieux refroidir la diode.

Le problème est de déterminer le courant nécessaire,  $I_{forward}$ , pour avoir un nombre de lux précis à une distance désirée. Le flux lumineux  $\Phi$  (en lumens) peut être considéré linéaire en fonction du courant dans la diode 15, où  $k_f$  serait la pente de la droite.

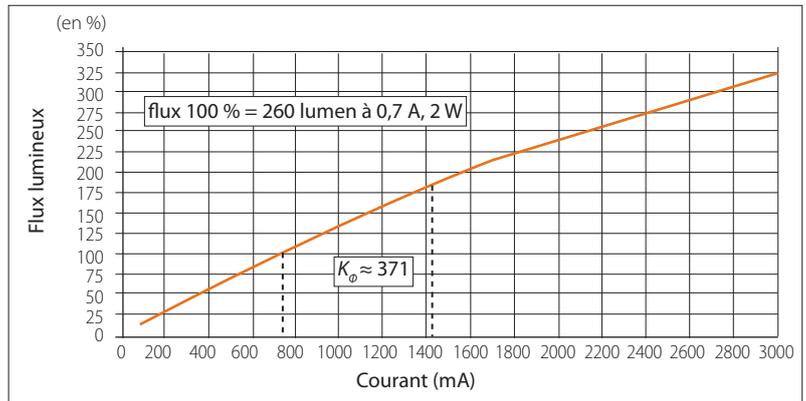
Le courant correspond à l'équation suivante dans le cas d'une configuration en série de LED :

$$I_{forward} \approx \Phi / (k_f \times nbr_{LED})$$

Par exemple, si on désire 70 lux à 15 m en utilisant la formulation de l'éclairage vue précédemment avec un réflecteur de  $5^\circ$  ( $\theta_{moy}$ , angle moyen), le rayon d'éclairage sera de 1,75 m avec une surface de  $9,76 \text{ m}^2$  et le courant correspondra à l'application numérique suivante :

$$I_{forward} \approx 2 \times E \times \pi (\text{distance} \times \tan \theta_{moy})^2 / (k_f \times nbr_{LED})$$

$$I_{forward} \approx 2 \times 70 \times \pi (20 \times \tan 5^\circ)^2 / (371 \times 4) = 0,9 \text{ A}$$



15 Flux lumineux donné par le constructeur en fonction courant [7]

On peut en déduire la puissance absorbée en connaissant la tension de seuil en fonction du courant. Cette tension peut être considérée comme l'équation suivante (entre 0,2 et 3 A) pour une LED blanche Cree XML [7] à  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  :

$$V_{forward} (I_{forward} = 0,9 \text{ A}) \approx 2,73 + 0,192 \times I_{forward} = 2,9 \text{ V}$$

Par conséquent, la puissance demandée par quatre LED correspond à l'équation suivante :

$$P \approx nbr_{LED} \times V_{forward} \times I_{forward} = 4 \times 2,9 \text{ V} \times 0,9 \text{ A} = 10,45 \text{ W}$$

Pour modifier le flux lumineux, il suffit de faire varier le courant dans la ou les LED.

Pour augmenter la puissance lumineuse dans un encombrement donné, donc pour un certain dissipateur, on augmente souvent le nombre de LED (trois LED de 3,3 W à la place d'une LED de 10 W), mais avec un diamètre plus grand, passant de 22 à 50 mm. Pour quatre LED, le diamètre sera de 60 mm et, pour sept LED, 68 mm.

### La commande de la LED

L'éclairage avant demande une puissance lumineuse importante de nuit; en revanche, de jour, par temps de brouillard, une puissance lumineuse divisée par 2 est suffisante. Par quel moyen peut-on faire varier la puissance lumineuse ?

Tous les éclairages de puissance à LED ont un régulateur de courant utilisant le hachage (PWM pour *Pulse Width Modulation*) [8]. Donc, malgré la fluctuation de la tension d'entrée d'une batterie, la puissance absorbée par la LED est constante, le flux lumineux est constant, ainsi que la dissipation thermique. Il n'y a donc pas de destruction possible de la LED.

Le circuit imprimé du convertisseur DC/DC est indépendant du circuit imprimé des LED pour minimiser l'interaction de la température sur le régulateur. Par conséquent, en fonction de la tension de la batterie et du nombre de LED, il y a différents types de convertisseur DC/DC. Certains sont des

régulateurs abaisseurs (*step down, Buck*), d'autres éleveurs (*step up, Boost*) et certains convertisseurs sont éleveurs et abaisseurs. Tous ces convertisseurs s'appellent des alimentations à découpage (*switch mode power supply*). Nous allons détailler seulement les convertisseurs abaisseurs. Car il y a pléthore de circuits intégrés qui permettent de commander des LED et il n'est de toute manière pas facile de trouver le bon circuit en fonction de son besoin. Dans tous les cas, ces convertisseurs DC/DC sont vendus par de nombreux constructeurs pour quelques euros.

Un autre avantage de ces convertisseurs est que le transistor de commutation permet d'arrêter l'éclairage sans devoir utiliser de gros interrupteurs. Cependant, dans ce cas, le circuit intégré consommera toujours un peu de courant, ce qui est préjudiciable à la batterie : il faut donc déconnecter la batterie lors des longs arrêts.

Comment choisir ? Circuits intégrés ou convertisseur ?

### Le convertisseur à courant constant de la LED

La régulation à courant constant demande une résistance *shunt*, de mesure, en série avec la LED et une contre-réaction (*feedback*). Souvent, les circuits intégrés proposés permettent d'avoir une consigne variable (*dimming* analogique ou PWM). Dans le cas contraire, il faut modifier la valeur de mesure du courant constant en changeant la valeur de la résistance *shunt*.

Observons le principe d'un régulateur de courant avec PWM 16.

Le transistor Q1 hache la tension d'entrée pour avoir une tension moyenne sur l'entrée de l'inductance. Cette inductance permet de filtrer le courant pour avoir un courant constant dans la LED D1 grâce à la diode D<sub>L</sub> de roue libre. La contre-réaction et l'oscillateur de la PWM sont gérés par un circuit intégré. Le condensateur C<sub>L</sub> permet de filtrer la légère fluctuation du courant (10 %) dans la résistance *shunt* R<sub>1</sub>.

Pour ce convertisseur, le transistor de hachage est interne au circuit intégré 17.

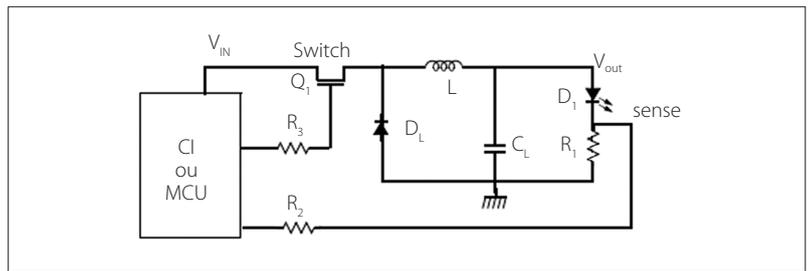
On peut alors observer les fonctions internes du MP 2370 avec l'oscillateur pour créer la PWM et les gains de la régulation du courant 18.

Il est alors possible de réguler le courant avec une fréquence PWM constante et une régulation rapide.

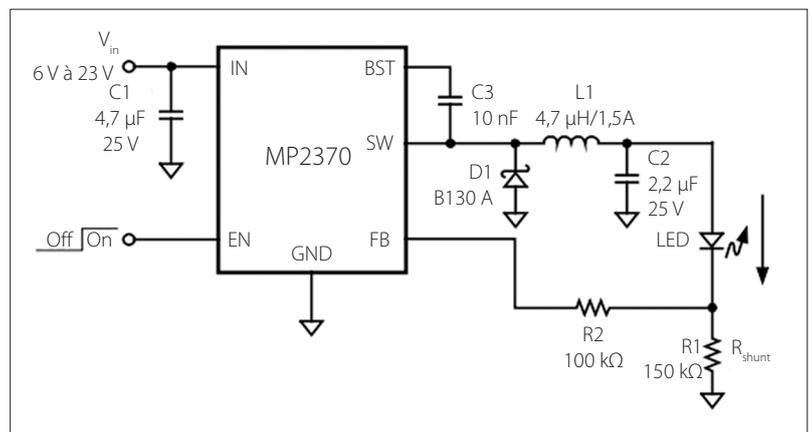
Il est aussi possible de faire la régulation par un simple comparateur qui a une hystérésis que l'on appelle communément « fourchette de courant ».

Pédagogiquement, c'est celui qui permet d'étudier le convertisseur le plus simplement possible, d'ailleurs il existe des kits [15].

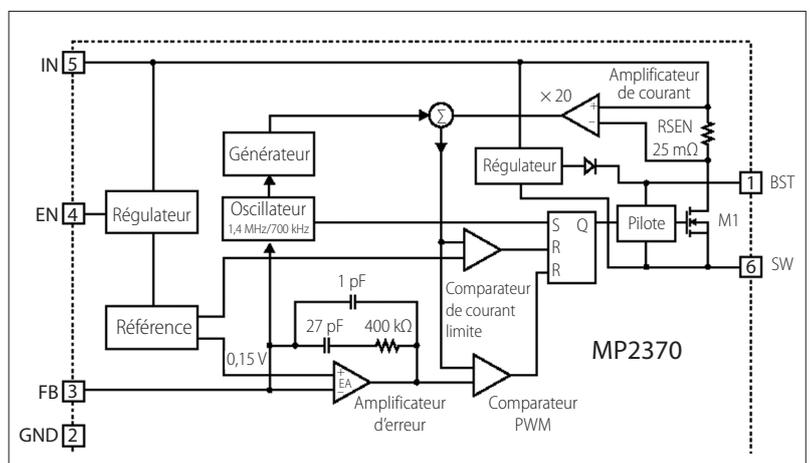
Sur la figure 19, étant donné que le comparateur AOP ne permet pas d'avoir assez de courant pour



16 Principe d'un hacheur abaisseur avec régulation du courant avec le transistor placé sur le pôle positif de l'alimentation d'entrée



17 Schéma électronique d'un hacheur abaisseur d'une régulation de courant pour LED



18 Schéma fonctionnel interne du circuit intégré MP 2370

commander le transistor de puissance Q1, les deux transistors Q2 et Q3 sont présents pour amplifier ce courant.

La fréquence de la PWM dépendra de l'hystérésis du comparateur. En effet, lorsque le courant dans la résistance *shunt* sera à la valeur I<sub>max</sub>, alors le transistor Q1 se bloquera. Donc, le courant diminuera grâce à la diode de roue libre, jusqu'au courant I<sub>min</sub> fixé par l'hystérésis.

Les valeurs de l'hystérésis sont égales aux équations suivantes où V<sup>-</sup> est l'entrée, broche 2, de l'AOP :

$$I_{\max} \cdot R_{\text{shunt}} = \frac{(R4 + R3)}{R3} \cdot V^-$$

$$I_{\text{mini}} \cdot R_{\text{shunt}} = \frac{(R4 + R3)}{R3} \cdot V^- - \frac{R4}{R3} \cdot U_{\text{alim}}$$

Avec une hystérésis faible, le courant moyen dans la LED correspondra à l'équation suivante :

$$I_{\text{moyen LED}} \approx (I_{\max} + I_{\text{mini}}) / 2$$

Le problème de ce type de convertisseur est que la fréquence dépend de l'hystérésis. Or, il ne faut pas que cette fréquence dépasse 200 kHz, car le transistor n'arriverait plus à commuter et il ne faut pas que la fréquence soit inférieure à 20 kHz, sinon il y aura un sifflement désagréable qui sera entendu par l'oreille humaine.

Or, la période de commutation dépendra de l'équation suivante :

$$T = L \cdot \Delta I \cdot \left( \frac{1}{U_{\text{alim}}} + \frac{1}{\text{tension}_{\text{seuil}} + 0,6} \right)$$

avec l'écart de courant  $\Delta I$  correspondant à :

$$\Delta I = I_{\max} - I_{\text{mini}} = \frac{R4}{R3} \cdot \frac{U_{\text{alim}}}{R_{\text{shunt}}}$$

À partir des deux équations précédentes, on peut observer que la fréquence de commutation va dépendre fortement de la tension d'alimentation, mais aussi de l'inductance.

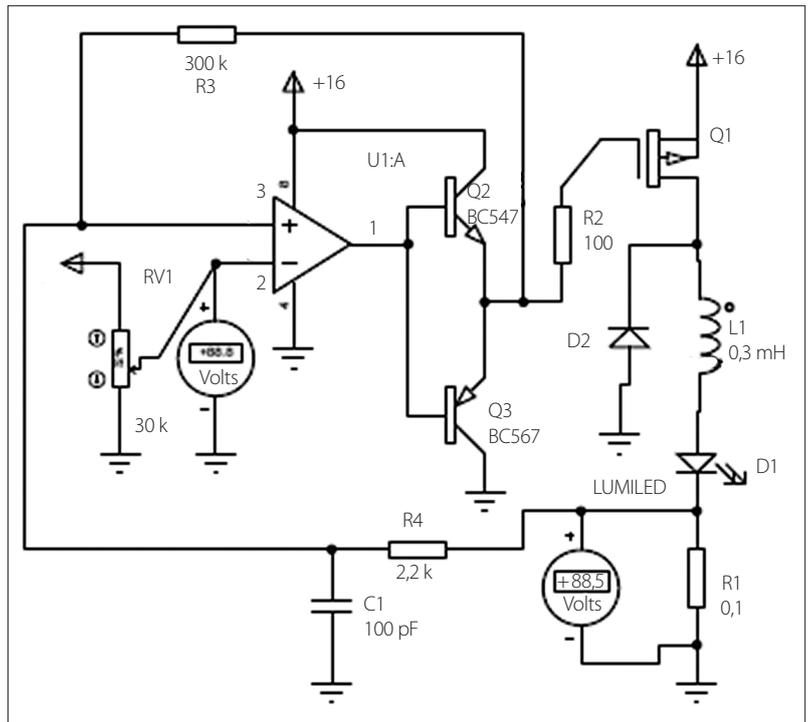
La tension sur la résistance de mesure est relativement faible (0,3 V) pour éviter des pertes dans cette résistance.

Par conséquent, la valeur de l'hystérésis est déterminée pour une valeur inférieure à la moitié de la tension précédente : 0,15 V <sup>19</sup>. Enfin, la valeur de l'inductance est déterminée pour avoir la fréquence de hachage la plus haute désirée pour minimiser son volume.

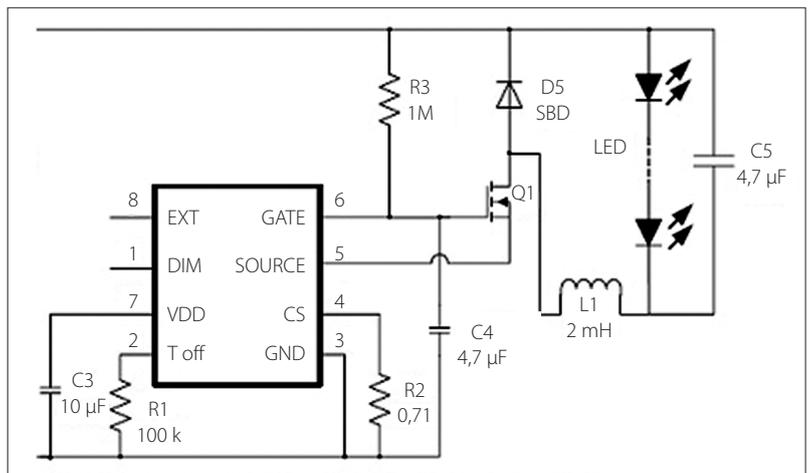
Pour augmenter le courant dans la LED, il suffit d'augmenter la tension  $V^-$  par l'intermédiaire de la résistance ajustable, mais il faut alors faire attention à ne pas dépasser les valeurs limites de courant du transistor, de la diode, de l'inductance et de la résistance *shunt*.

Si le transistor est placé sur la masse de l'alimentation d'entrée, alors le schéma de principe change <sup>20</sup>. Pour des courants supérieurs à 1 A, le transistor de hachage doit être mis à l'extérieur du circuit intégré sur un dissipateur.

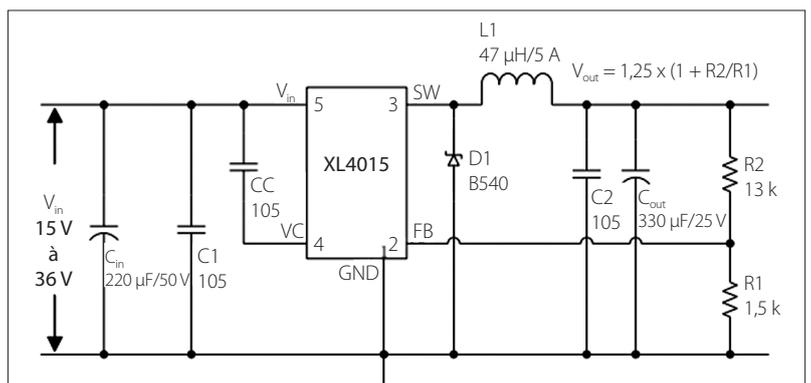
Pour l'éclairage de petite puissance tel que les rubans de LED sécables, les clignotants de moto, etc., une résistance de limitation de courant est utilisée avec une alimentation constante de 12 V. Nous allons détailler ce type de convertisseur.



19 Convertisseur à fourchette de courant (hystérésis) simulé avant sa réalisation



20 Schéma électronique d'un hacheur abaisseur d'une régulation de courant pour LED



21 Schéma électronique d'un hacheur abaisseur d'une régulation de tension avec transistor en interne 12 V 4 A (5 €)

### Le convertisseur DC/DC à tension constante

Pour utiliser les éclairages prévus pour les motos, l'alimentation à tension constante de 12 V est issue d'une batterie pour vélo électrique (36 V, 48 V ou 72 V). Cette tension de 12 V permet d'alimenter les bandes de LED arrière, mais aussi un convertisseur USB 5 V/2 A pour alimenter un smartphone.

Normalement, les régulateurs de courant précédents ne permettent pas d'être alimentés directement par une batterie de vélo électrique de 48 V, car la valeur du rapport cyclique de la PWM est trop faible pour avoir une bonne sensibilité au niveau de la régulation.

Pour les convertisseurs DC/DC à tension constante, la contre-réaction est faite sur la tension de sortie à partir d'un pont diviseur de tension à résistance [21]. Cette contre-réaction est comparée à une tension de référence interne de 1,25 V. En faisant varier le rapport des résistances du pont diviseur, la tension de sortie varie à la valeur désirée. On peut observer que la valeur du condensateur de sortie ( $C_{out}$  sur [21]) est 100 fois plus grande que pour une régulation de courant. En effet, ce condensateur permet de filtrer les fluctuations du hachage, mais aussi la variation du courant de sortie.

Lorsque la tension de seuil des LED est très proche de la tension d'alimentation, alors une résistance permet de limiter le courant dans les LED sans avoir trop de pertes dans cette résistance. Cette solution à résistance est généralement utilisée pour les LED qui sont alimentées par des courants inférieurs à 40 mA.

$$V_{forward}(T_j, I_{forward}) \approx 2,73 - \frac{0,21}{126 - 25} \times (T_j - 25) + 0,192 \times I_{forward}$$

La valeur de la résistance correspondra à :

$$R = \frac{U_{alim} - U_{seuil} \times nbr_{LED\_série}}{I_{limitation}}$$

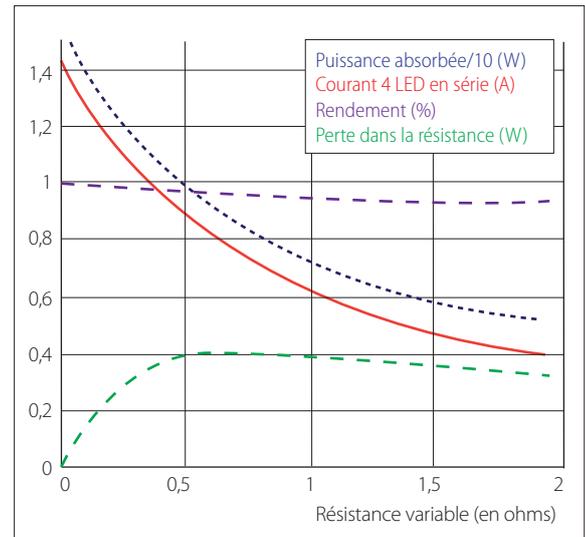
La perte de puissance dans cette résistance correspondra à l'équation suivante :

$$Perte \times nbr_{LED\_parallèle} = (I_{limitation})^2 \times R$$

Il est possible de multiplier le nombre de LED avec des branchements en parallèle.

Même pour des courants importants de 3 A le rendement peut être amélioré par l'utilisation d'une résistance. Le courant, la puissance absorbée, les pertes dans la résistance, quatre LED (Cree blanche) et une alimentation 12 V peuvent être observés en fonction de la résistance [22].

Le problème est que la tension de seuil  $V_{forward}$  diminue lorsque la température de jonction  $T_j$  augmente [5]. Cette variation est d'environ 0,21 V entre 25 et 125 °C (-2,1 mV/°C). Par conséquent, la tension



22 Mesure des performances de l'alimentation de quatre LED Cree [7] avec une résistance variable en série de 2 Ω [10]

de seuil  $V_{forward}$  peut être modélisée en fonction de la température :

Pour une tension d'alimentation constante, il y a un risque de divergence de puissance sur la LED. Il faut donc une chute de tension dans la résistance en série minimum qui compense la variation de la tension seuil. La mesure de la tension seuil pourrait permettre de connaître la température de jonction de la LED.

La régulation de courant permet d'éviter le risque de divergence thermique, d'où son utilisation plus pertinente qu'une alimentation constante.

### Performance des convertisseurs DC/DC PWM

Pour améliorer l'autonomie en temps pour l'éclairage, il faut que les convertisseurs DC/DC aient un bon rendement.

Grâce à leur fonctionnement en commutation, les transistors ont peu de pertes de puissance. Mais plus la fréquence de découpage (40 à 200 kHz) est importante et plus il y a des pertes dans le transistor. L'électronique interne du circuit intégré consomme un peu de courant (30 à 40 mA). Par conséquent, il y aura une puissance perdue dans le convertisseur DC presque constante et le rendement sera aux alentours de 90 % pour toute une plage de courant [23].

Par contre, on remarque que lorsque la tension d'entrée est importante, alors le rendement se dégrade légèrement à cause du courant consommé par le circuit intégré.

Les chargeurs de téléphone USB 5 V, qui sont des convertisseurs DC/DC, peuvent aussi bien fonctionner avec une source de tension alternative ou

continue avec une grande plage de tension. Peut-on utiliser ces chargeurs à partir d'une batterie de vélo ?

Avec ceux-ci, le rendement s'affaiblit lorsque la tension diminue. De plus, pour une tension de 40 V AC, le courant maximum de sortie ne dépassera pas 0,5 A. Nous avons réalisé des tests avec trois tensions différentes : 70 V DC, 70 V AC et 200 V AC [24]. Avec une tension de 70 V DC, le rendement est seulement de 40 %.

Par conséquent, pour tester un éclairage, il faut aussi tester son électronique. C'est pourquoi nous allons tester quatre phares de différentes puissances avec réflecteur parabolique.

### Test de différents phares avants

Pour bien comprendre l'avantage de différentes lampes, le tableau 25 compare différents éclairages avants en fonction du nombre de LED, de l'encombrement, de la masse, de l'optique et des rendements du régulateur.

Le prix de l'éclairage n'est pas un facteur de qualité, car celui-ci est fonction du nombre de ventes et de la marge du vendeur.

Lorsqu'une batterie au lithium est déchargée à 100 %, alors elle est hors d'usage et doit être changée. Or, seule l'électronique de l'éclairage à une LED s'arrête lorsque la détection de la tension de la batterie est trop faible. Aucune LED n'est protégée en fonction de la température du boîtier. Pourtant, cette mesure de température permettrait de protéger la LED si la température ambiante est trop élevée et d'interagir en fonction du refroidissement provoqué par le déplacement du véhicule. Cette mesure de température permettrait donc de pouvoir utiliser la pleine puissance de la LED en fonction de la convection.

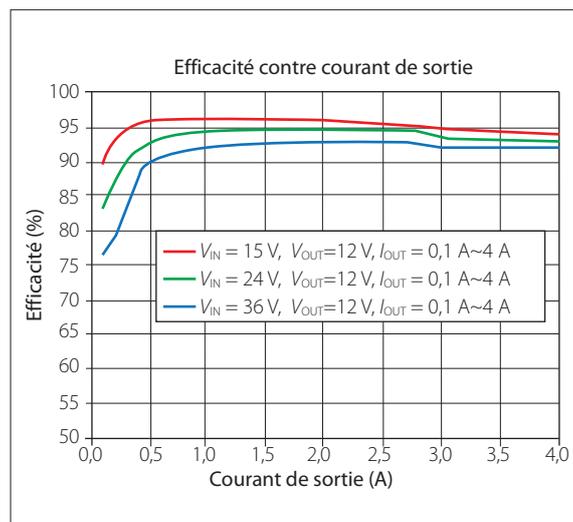
Lors de la recharge, il n'y a pas de BMS (*Battery Management System*) pour rééquilibrer les éléments en série, ce qui est préjudiciable à la fiabilité des batterie [14].

Les tests de l'éclairage sur un mur à une distance de 0,5 m pour connaître le nombre de lumens 26 montrent que la diminution de l'éclairage en fonction de l'angle du réflecteur est linéaire autour du centre, puis il y a une lueur circulaire. Ce qui explique que dans le tableau 25 le nombre de lumens a été déterminé pour un deuxième angle et qu'il y a un zoom de la courbe 26 pour les distances comprises entre 0,2 et 0,5 m par rapport au centre.

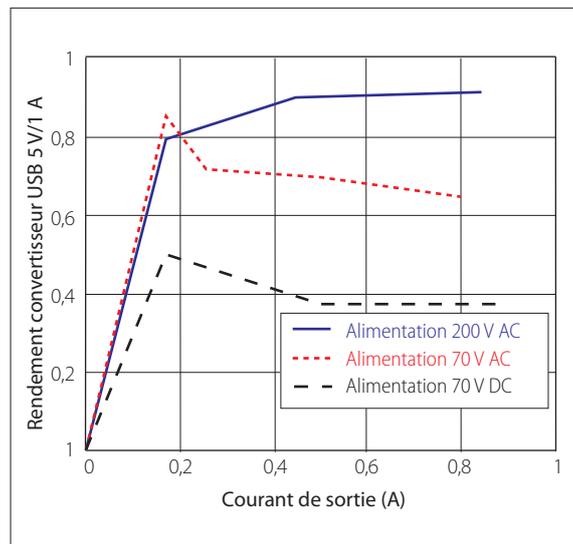
À partir des mesures et de l'équation vues précédemment, donnant l'éclairage (en lux) sur une couronne, la détermination de la valeur du flux est facile avec un tableur. Cette mesure permet aussi de déterminer l'angle moyen du réflecteur 4.

Les figures 27 et 28 donnent l'éclairage au niveau du sol de la lampe 7 LED 1 820 lumens placée à 1 m

Pour tester un éclairage, il faut aussi tester son électronique



23 Performance du XL4015 convertisseur 12 V/4 A



24 Performance d'un chargeur Panasonic 5 V/1 A [10]

et 0,7 m de hauteur, ainsi que la lampe à 1 LED de 550 lumens avec une inclinaison pour éclairer à partir de 13 m.

On peut observer que le flux lumineux est plus important au niveau du sol lorsque la lampe est moins haute. C'est évident, car l'ellipse sur le sol est plus petite.

Entre 7 et 15 m, une lampe avec un réflecteur où l'angle est petit (5 à 7°) permet d'éclairer autant la partie désirée de la route qu'avec celle d'un angle de 11° 27.

La figure 28 donne l'éclairage reçu à 1,75 m de hauteur permettant de connaître l'éventuel éblouissement d'un piéton ou d'un autre cycliste dans le centre du faisceau. Si l'on se décale de 1 m de l'axe central du faisceau lumineux, alors une diminution de 10 lux est encore à appliquer en ce qui concerne l'éblouissement.

Nombre de LED de 3 W maxi	1 Régulation courant	4 en série Régulation courant	4 en série Régulation tension	7 en parallèle Régulation courant
L x Ø (en cm)	14 x 4	6,8 x 5,5	5 x 5,5	6 x 6,8
Masse (en g)	150	170	170	255
Demi-angle du réflecteur / lumens	5,7° / 450 31° / 52	5,7° / 345 31° / 243	9° / 775 38° / 384	11° / 1 400 45° / 420
Puissance alimentation (en W)	4,4	9,3	16,8	20
Puissance LED (en W)	4	5	10,9	15
Rendement DC/DC	90 %	53 %	64 %	75 %
Flux (en lumens)	500	588	1 160	1 820
Nombre de lum/W	112	106	106	120
RTH <sub>HA</sub> (en °C/W)	5	2,7	9,6	2,8
Δ Température du dissipateur (en °C)	20	25	106	42
Tension d'entrée (en V)	3 à 4,2	12 à 80	8,4	6 à 30
Prix éclairage (en €)	50	10	12	30
Batterie lithium : configuration des éléments de type 18650 (φ 18 mm et 65,0 mm)	1	2S 2P	2S 2P	2S 3P
Prix batterie (en €)	3	13	13	20

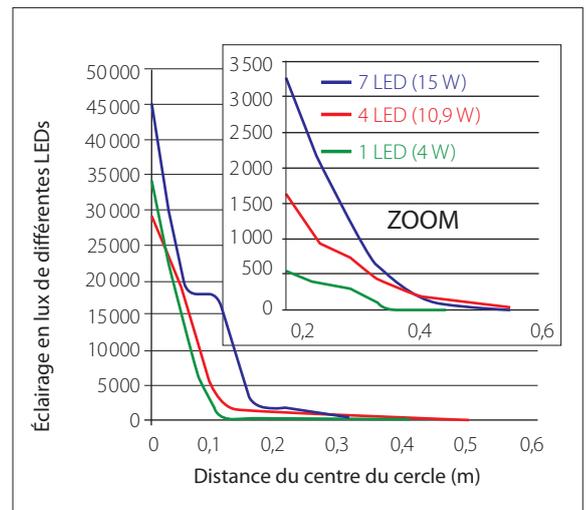
**25** Caractéristiques de phares avant, blanc neutre

Par conséquent, on peut observer qu'à 25 m l'éclairage d'un piéton est relativement faible, mais qu'il sera vu et qu'il ne sera pas trop ébloui. L'éclairage d'une seule LED à 25 m avec un angle petit est un peu juste par rapport à l'éclairage 7 LED pour que le cycliste puisse voir les obstacles et les panneaux de signalisation.

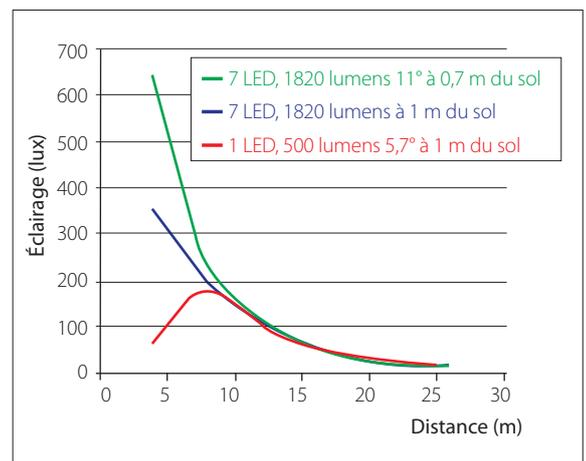
Pour minimiser l'éblouissement de nuit, à la place d'utiliser un réflecteur parabolique, il est possible d'employer un réflecteur qui crée une surface sur le sol en forme d'ellipse dont le grand rayon est X fois plus grand que le petit rayon. Sachant que ce petit rayon doit correspondre, *a minima*, à la largeur du véhicule et donc à 1 m pour un vélo, souvent une valeur de 2 à 3 m est définie permettant de voir les bas-côtés de la route.

**Le circuit de protection de l'éclairage vélo**

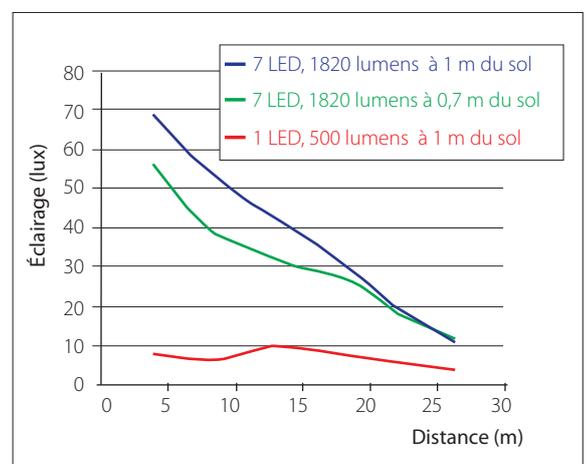
Un fusible rapide (CMS) en entrée du convertisseur est une nécessité pour protéger la source d'alimentation. Pour l'échauffement, qui est le problème majeur des



**26** Éclairage pour trois lampes à 0,5 m d'un mur en fonction de la distance par rapport au centre



**27** Éclairage au niveau du sol en fonction de la distance de la source lumineuse



**28** Éclairage à 1,75 m de hauteur (hauteur des yeux d'un adulte) en fonction de la distance de la source lumineuse

LED et du circuit d'alimentation, un thermostat bimétallique (*thermal switch or cut off*) est une solution de protection efficace. Ce thermostat est aussi surnommé interrupteur ou fusible thermique, thermorupteur... Il permet de mettre en sécurité l'éclairage en coupant l'alimentation si la température du radiateur est trop importante. Il existe de nombreuses marques et formes, en voici quelques exemples : ksd97000, ksd01E, JUC31E, Airpax, Multicomp, Klixon, Selco, Eska...

Pour quelques euros, ces interrupteurs s'ouvriront à une certaine température de seuil. Il y a une hystérésis de ré-enclenchement, ainsi l'interrupteur se refermera pour une température de 20 °C inférieure à la température de seuil.

### Conclusion

Cet article avait pour objectif de présenter les caractéristiques des LED et leurs usages adaptés à la pratique du vélo. Il a montré que la puissance lumineuse est limitée par les particularités du dissipateur (surface, matériau, encombrement...), ainsi que par les caractéristiques du convertisseur DC/DC. Il a fourni les éléments permettant de mesurer le flux lumineux de chaque éclairage et d'estimer l'autonomie de fonctionnement. Ces connaissances permettent d'éviter les écueils dus aux caractéristiques peu fiables données par de nombreux fabricants et distributeurs [9, 10].

Malheureusement, les constructeurs ne donnent que très rarement les performances de leur éclairage. Sur l'ensemble de 30 fabricants que nous avons recensés, seulement deux fournissent la cartographie de l'éclairage sur le sol et un seul précise l'angle de l'éclairage avec le nombre de lux à 2,5 m et à 10 m.

Le prix d'un bon éclairage vélo débute à 30 € avec une batterie au lithium, mais il peut atteindre des sommes beaucoup plus importantes, dépassant parfois les 200 € sans justification d'efficacité apparente. Par conséquent, le prix n'est pas un gage de qualité et de fiabilité du produit.

Ajoutons à cet éclairage la partie législative française sur les vélos qui demande l'utilisation de catadioptrés (dispositifs rétro réfléchissants) de couleur rouge à l'arrière, de couleur blanche à l'avant, de couleur orange sur les côtés et sur les pédales, ainsi qu'un gilet jaune hors agglomération permettant d'être visible à 160 m par une voiture. Mais lorsque le cycliste utilise un sac à dos, le gilet jaune avec bande rétro réfléchissante de catégorie 1 de classe 3 (0,2 m<sup>2</sup>), 2 (0,13 m<sup>2</sup>) ou 1 (0,10 m<sup>2</sup>) perd en efficacité [17]. Par contre, la législation actuelle n'oblige pas les sacs à dos à arborer des bandes réfléchissantes !

Notons enfin que depuis plus de 10 ans les pneus de vélo peuvent posséder une bande rétro réfléchissante sur leur flanc comme complément visuel.

### RÉFÉRENCES

- [1] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Lux\\_\(unit%C3%A9\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Lux_(unit%C3%A9))  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Pouvoir\\_de\\_r%C3%A9solution](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pouvoir_de_r%C3%A9solution)
- [2] <https://goo.gl/iKy4oi>
- [3] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Phare\\_\(automobile\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Phare_(automobile))
- [4] O. Schultz, *Lumière pour vélo*, thèse, université de Hambourg, 2010.  
[www.enhydralutris.de/Fahrrad/Beleuchtung.pdf](http://www.enhydralutris.de/Fahrrad/Beleuchtung.pdf)  
[www.enhydralutris.de/Fahrrad/Beleuchtung/index.html](http://www.enhydralutris.de/Fahrrad/Beleuchtung/index.html)
- [5] A. Sivert, F. Betin, B. Vacossin, S. Carrière, « Convertisseur, régulateur de LED blanche de 10 à 100 W », *Revue 3EI*, 85, juillet 2016, 10 p.  
<http://www.fichier-pdf.fr/2016/10/21/LED-100watt-regulation-revue-3ei/>
- [6] A. Sivert, F. Betin, B. Vacossin, J. Accart, J. Claudon, « Véhicule électrique à faible consommation. Problématique mécanique des tricycles carénés caractérisation avec smartphone », *Technologie*, septembre 2015.
- [7] [www.cree.com/LED-Components-and-Modules/Products](http://www.cree.com/LED-Components-and-Modules/Products)  
[www.cree.com/~media/Files/Cree/LED-Components-and-Modules/XLamp/Data-and-Binning/XLampXML.pdf](http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED-Components-and-Modules/XLamp/Data-and-Binning/XLampXML.pdf)
- [8] S. Winder, *Power Supplies for LED Driving*, 2011.
- [9] Forum sur les LED : <http://forum.LED-fr.net/>
- [10] Forum éclairage pour vélo forte puissance :  
<http://velorizantal.bbfr.net/t16874-eclairage-a-del-pour-velo-LED-light-for-bike-light-electro-diode>
- [11] Data sheet de réflecteur :  
[www.farnell.com/cad/1664396.pdf?\\_ga=1.158070143.47511706.1477676799](http://www.farnell.com/cad/1664396.pdf?_ga=1.158070143.47511706.1477676799)
- [12] Y. Lo, J. Cai, « A compact bike head lamp design based on a white LED operated at one watt », *Optics & Laser Technology*, 2011.
- [13] C. Sun, Y. Lo, « Anti-glare LED projection lamp based on an optical design with a confocal double-reflector », *Optics Communications*, 285, 2012.
- [14] A. Sivert, F. Betin, B. Vacossin, M. Bosson, T. Lequeu, « Capacité énergétique, diagnostic, durée de vie de batterie lithium. Application à l'estimation de l'autonomie d'un véhicule électrique », *SGE*, juin 2016,  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01361682/document>
- [15] Kit driver LED 3 à 6 W, 1 A (Velleman) 5 € :  
[www.vellemanprojects.eu/downloads/0/infosheets/k8071\\_fr.pdf](http://www.vellemanprojects.eu/downloads/0/infosheets/k8071_fr.pdf)
- [16] Datasheet lentille convergente :  
[www.farnell.com/datasheets/1503655.pdf?\\_ga=1.6624242.1792095276.1479649026](http://www.farnell.com/datasheets/1503655.pdf?_ga=1.6624242.1792095276.1479649026)
- [17] Ces bandes rétro réfléchissantes sont des microbilles sur une fine couche d'aluminium qui renvoie la lumière comme un miroir. Deux classes existent en fonction de la rétro réflexion (1 : 20 cd/lux/m<sup>2</sup> ; 2 : 56 cd/lux/m<sup>2</sup>).

Voir ou être vu sont deux choses bien différentes. Si la lumière nous ouvre le chemin pour nous déplacer en toute sécurité en laissant l'obscurité sur le bas-côté, les constructeurs devraient fournir beaucoup plus d'informations pour permettre aux consommateurs de ne pas faire des achats à l'aveugle. Ces informations permettraient de mieux communiquer sur l'aspect sécuritaire que représente ce mode de déplacement écologique.

La communication de masse, dans ce domaine, concerne malheureusement plutôt les automobilistes. ■